

3.4 千葉県環境研究センターにおける有効応力解析による検証

3.4.1 解析検討の目的

千葉県環境研究センター（千葉県美浜区稲毛）では、2011年東北地方太平洋沖地震(以下、東北地方太平洋沖地震とする。)により、大規模な液状化が発生したが、1987年千葉県東方沖地震(以下、千葉県東方沖地震とする。)では、液状化現象は認められなかった。このことから、両地震の液状化のメカニズムを解明するため、ボーリング調査等のデータを用い、有効応力解析¹を行った。また、東北地方太平洋沖地震では、14時56分発生の本震($M_J=9.0$)に引き続いて、15時15分に最大余震($M_J=7.6$)が発生したことから、本震と最大余震の液状化への影響を明らかにするため、余震を加味した有効応力解析も実施した。

3.4.2 現地の液状化発生状況

千葉県環境研究センターは、本震によりボーリング地点に近接する研究棟玄関で液状化により泥水が噴出したことが目撃されている。また、ボーリング地点に隣接する強震動観測点((独)防災科学技術研究所 CHB024)の地震記録では、本震発生時にスパイク状波形が観測され、液状化したことが記録に残っている。ボーリング地点の周囲は、地割れや噴砂が確認され、本震又は余震時に液状化したことが確認されている。

さらに、千葉県地質環境研究室が行ったボーリングのコア観察結果を図3.4.2-1と図3.4.2-2に示した。コア観察結果によると深度2.0m～2.3mに液状化によると思われる擾乱が認められ、この深度で液状化が発生したことが推定されている。

加えて、観測地点の土性を細かく調べるために、隣接地でRI（ラジオアイソトープ）によるコーン貫入試験も実施している。図3.4.2-3(1)にRIコーン試験調査結果の説明を示し、千葉県環境研究センターのRIコーン試験(No.1とNo.2)の結果を、図3.4.2-3(2)と(3)に示した。RIコーン貫入試験でも、深度2.5m付近で液状化による噴砂が生じた可能性が高い結果となった。

なお、ボーリング調査では、コアの採取、標準貫入試験のほか、乱さないサンプリング、PS検層および動的室内試験を行っている。

¹ 有効応力解析：地盤を水の部分と土そのもの（土骨格）の部分とに分割して、水の部分により伝わる力（間隙水圧）と有効応力（土骨格を通して伝達される力）とを別々に解析する手法。液状化などの水と土骨格が複雑に関与する現象の解析に適用される。

No.5 地盤調査

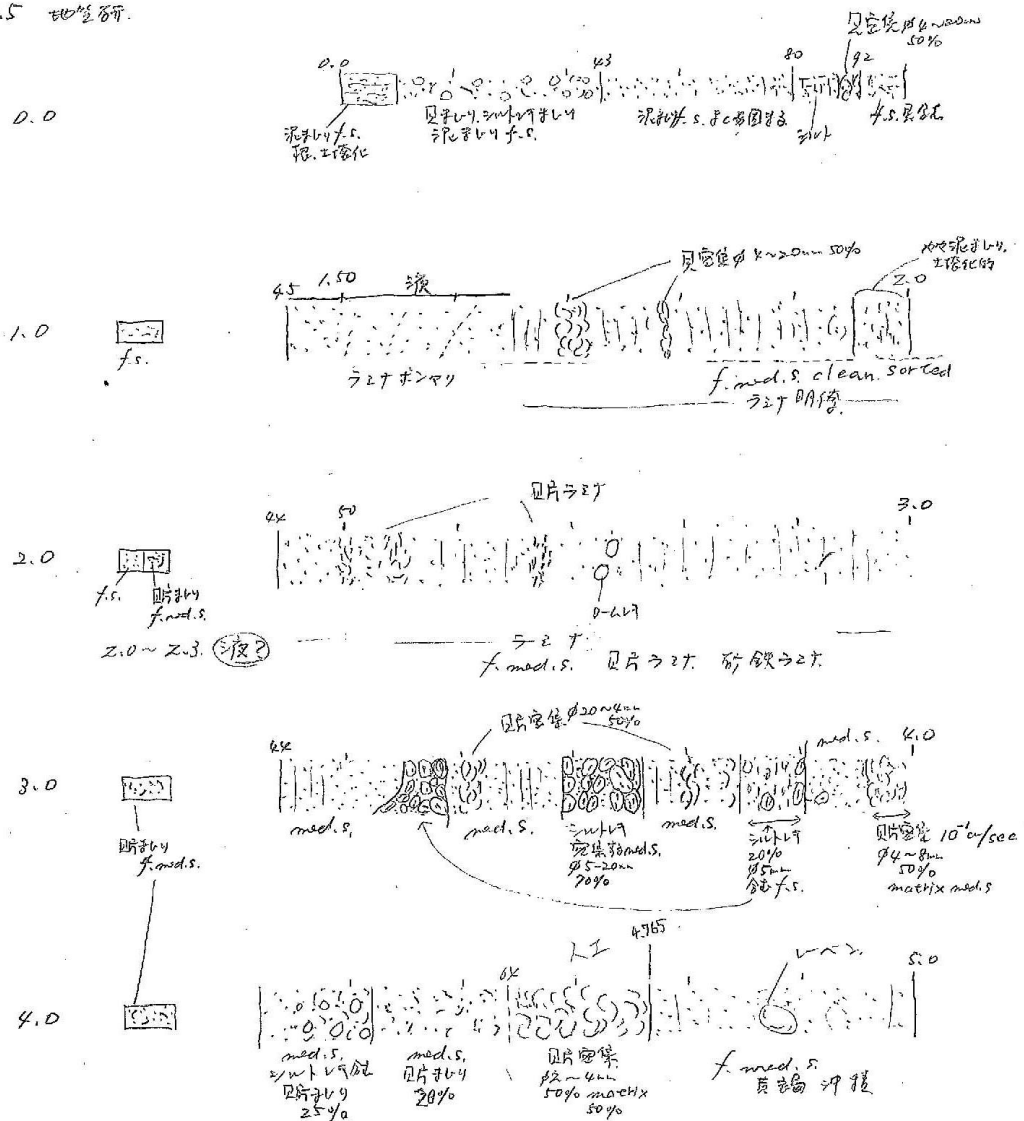


図 3.4.2-2 千葉県環境研究センターでのコア観察結果 その2

液状化被災地盤に対する RI コーン貫入試験調査結果（速報）

ORI コーン貫入試験

電気式のコーン貫入試験器(CPTU)に散乱型 RI 密度計、散乱型 RI 水分計を組合せた多成分コーン貫入試験器を RI コーンと呼んでいる。RI 法はラジオアイソトープ(Radio-Isotope、放射性同位元素)を利用して、密度計はガンマ線、水分計は中性子線と地盤の構成物質との相互作用の結果として検出器に入射する放射線の強度から、地盤の湿潤密度、あるいは含水量（水分密度）を測定する方法である。

RI コーンのシステムは、図-1 に示すプローブ群と、地盤に貫入する反力装置である自走式貫入車(図-2)、地上でプローブからの信号を処理する計測器から構成される。

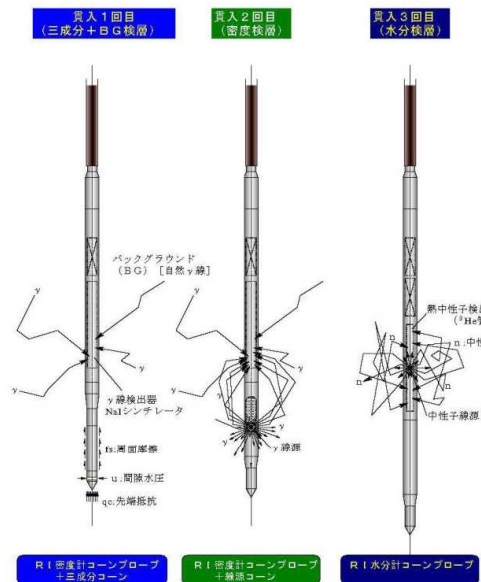


図-1 RI コーンのプローブ群

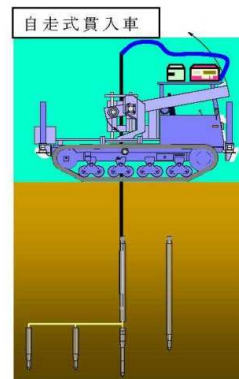


図-2 システム概要

○試験調査結果

RI コーン貫入試験による測定値の鉛直分布図を次ページから示す。

各図には左から電気式コーン貫入試験による地盤の土性判断（柱状図）、地盤中の自然放射能に由来するバックグラウンドのガンマ線強度(BG)、含水量 ρ_w 、湿潤密度 ρ_t とこれらから算定される乾燥密度 ρ_d 、含水比 w 、間隙比 e 、コーンの先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u を示している。

地盤の土性判断は先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s と間隙水圧 u の関係から行うロバートソンらの方法に拠っている。なお、コーン貫入試験で測定される間隙水圧 u はコーンの貫入に伴って応答しており、地盤のダイレイタンスの影響や貫入に伴う非排水せん断(粘性土)のために正負の過剰間隙水圧が発生するため、地盤中の平衡水圧ではない。

調査地点の結果を概観すると以下の点が指摘できる。

1) 浦安市高浜 8 丁目地点

多少細部に違いはあるが 5 つの測点とも、上位から砂質土優勢層(～GL-1m 付近)、粘性土優勢層(～GL-8m 付近)、砂質土優勢層(～GL-16m 付近)、粘性土優勢層(～GL-32m 付近)、砂質土優勢層(～GL-37m 付近)、粘性土優勢層(～GL-44m 付近)となり、工学的基盤層(おそらく Ds 層)に達している。

2) 千葉市美浜区稲毛海岸 3 丁目（千葉県環境研究センター）

近接した 2 点で、GL-20m 付近まで砂質土から構成される地盤である。ただし GL-2.5 付近の、密度と含水比に差異があり、No1 の方が乾燥密度が大きく、含水比が小さくなっている。この深度付近が液状化して噴砂を生じた可能性が考えられる。

3) 千葉市美浜区高浜 1 丁目（袖ヶ浦第 4 緑地）

測点 No.2 では砂質土が優勢、No.4 では粘性土優勢、No.3 では砂泥互層の傾向を示しており、地盤状況はそれぞれ異なっている。旧地形の複雑なことを示していると考えられる。

液状化被害は No.2 側で大きく、事実、No.2 では噴砂がまだ 5～10cm の厚さで堆積している。No.4→No.5 で液状化被害が比較的小さかったことは、地盤構造を反映していると考えられる。

4) 香取市地点

香取市地点では、佐原北に位置する北 2 丁目公園(A 地点)、佐原口に位置する十間川沿(B 地点)、および佐原ハに位置する新島中学校(C 地点)の 3 地点で試験調査を実施した。この内、A 地点は非液状化地点とされている。A 地点と B 地点は直線距離で約 600m、C 地点はこれらから約 5km 離れている。

A 地点では GL-2～4m 付近に粘性土層があり、この上下に砂質土層がある。貫入不能となった GL-1.2m は締まった礫質土と推察され、液状化による噴砂を抑止した可能性がある。B 地点は、土性判断に現れていないが GL-1.5m 付近に粘性土層があると考えられ、これを突き破るように噴砂したものと推察される。C 地点にも GL-1m 付近に中間土層（粘性土層？）の存在が指摘できる。

○調査地及び期間と貫入試験点数

① 浦安市高洲 8 丁目	平成 23 年 10 月 31 日～11 月 2 日	5 点
② 千葉市美浜区稲毛海岸 3 丁目	平成 23 年 11 月 7 日	2 点
③ 千葉市美浜区高浜 1 丁目	平成 23 年 11 月 8 日	3 点
④ 香取市	平成 23 年 11 月 9～10 日	3 点

図 3. 4. 2-3(1) 千葉県環境研究センターほかでの RI コーン測定結果の説明

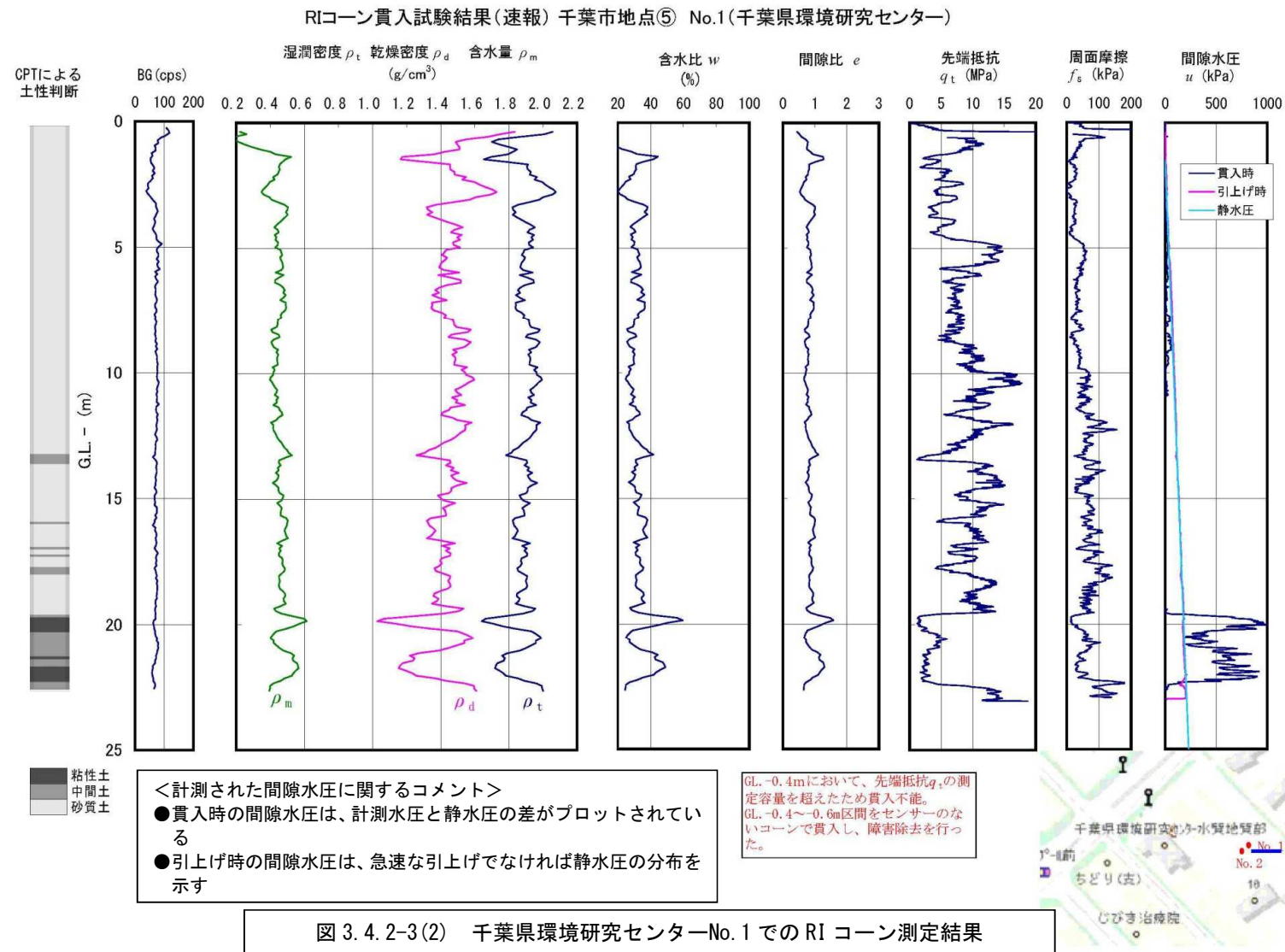


図 3. 4. 2-3(2) 千葉県環境研究センターNo. 1 での RI コーン測定結果

RIコーン貫入試験結果(速報) 千葉市地点⑤ No.2(千葉県環境研究センター)

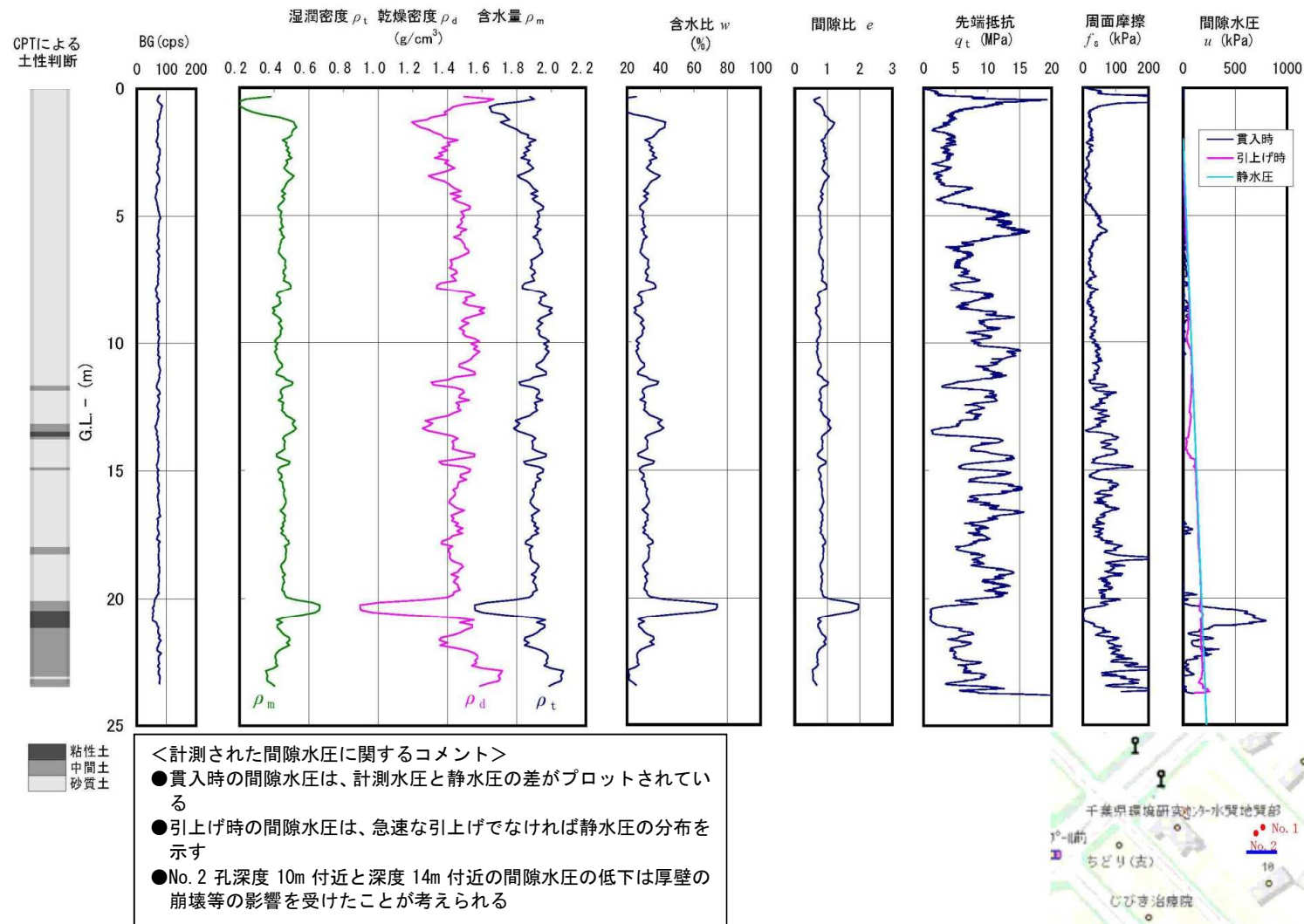


図 3. 4. 2-3 (3) 千葉県環境研究センターNo. 2 での RI コーン測定結果

3.4.3 有効応力解析

1) 東北地方太平洋沖地震(本震)と千葉県東方沖地震の解析と比較

a) 解析条件

図 3.4.3-1 に有効応力解析で用いた入力加速度波形を示した。図 3.4.3-1 における千葉県東方沖地震の入力波形は、平成 19 年度の被害想定調査において統計的グリーン関数法で計算された同地点の 1km メッシュの線形の工学的基盤波形である。東北地方太平洋沖地震の入力波形については、千葉県環境研究センターの北東約 4km に位置する幕張メッセに設置した、千葉大幕張観測点で観測された地表加速度波形を、千葉県環境研究センターと同等の S 波速度の工学的基盤に引き戻したものである。千葉県東方沖地震の入力波の継続時間は 30 秒程度であるが、東北地方太平洋沖地震の入力波の継続時間は約 200 秒であり、最大余震を含めて考えると約 350 秒と非常に長くなっている。

上記入力波形を選択した理由は、次のとおりである。

- ① 千葉県東方沖地震の地表波形は観測地点が液状化した可能性があり、等価線形法地震応答解析で工学的基盤に戻すことができないため使用していない。
- ② 千葉県環境研究センターでの東北地方太平洋沖地震の地表観測波は、スパイク状の波形が現れており、サイズミック・モビリティが発生した可能性が高く、これを同地点で工学的基盤に戻すことは地震応答解析の手法上不可能であるため。

また、表 3.4.3-1 の地盤モデルは、今回のボーリング調査と動的室内試験によって得られた数値モデルである。有効応力解析で入力値として用いる液状化強度比については、基本的には表 3.4.3-1 に示すように動的室内試験結果の値を用いた。しかしながら、地層 No.3 の細砂層については、深度 8.0m から 23.5m 間で実施した動的室内試験の結果が、N 値と細粒分含有率(Fc)により道路橋示方書(2012)の推定式から求めた液状化強度比の層平均値に比べ明らかに低いことから、N 値と物理試験から求められた細粒分含有率(Fc)を用い、道路橋示方書(2012)の推定式により、繰返し回数 20 回の液状化強度比(R_{L20})を算出し設定値とした。さらに図 3.4.3-3 に示すように、Tatsuoka et al.(1988)²による液状化強度の年代効果、つまり地盤生成年代が古くなると液状化強度が増加する現象を考慮して、地層 No.3 の細砂層については 20 回の液状化強度比(R_{L20})を 1.4 倍にした。また、地層 No.3 の繰返し回数 5 回の液状化強度比(R_{L5})については、吉田ら(2009)³による R_{L20} と R_{L5} の関係式より繰返し回数 5 回の液状化強度比を求めた。地下水位は、今回のボーリング調査時の無水掘りによる地下水位を考慮して、G.L.-1m と設定している。有効応力解析のソフトは、この分野で広く用いられている東畑・吉田(1995)⁴による YUSAYUSA-2 を用いた。

b) 解析結果

千葉県東方沖地震と東北地方太平洋沖地震の有効応力解析による、各深度の過剰間隙水

² Fumio Tatsuoka, Hiroyuki Kato, Masaru Kimura and Tej B. S. Pradhan(1988): Liquefaction Strength of Sands Subjected to sustained Pressure, Soils & Foundations, vol.28, No.1, pp119-131.

³ 吉田望・大矢陽介・澤田純男・中村晋(2009): 海溝型長継続時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性, 日本地震工学会, 第 9 巻, 第 3 号, pp.28-47.

⁴ 東畑郁生・吉田望(1995): YUSAYUSA-2 理論と使用法 (改訂版 ver.2.02).

圧比⁵分布を図 3.4.3-2 に図示した。過剰間隙水圧比を用いた完全な液状化発生の定義は、委員会での意見を踏まえて、過剰間隙水圧比=0.9 とした。(地盤工学会(2000)⁶による過剰間隙水圧比=0.95 などがある。)また、過剰間隙水圧比=0.6 以上になると液状化の初期状態と考えられている(安田(1988)⁷)。

千葉県東方沖地震では、過剰間隙水圧比は入力値の大きな EW 成分が NS 成分より大きい、深度 6m 付近で最大 0.4 程度である。また、東北地方太平洋沖地震でも同様に過剰間隙水圧比は入力の大きな EW 成分の方が大きく、深度 5.5m 付近で、最大 0.65 程度である。この結果では、両地震とも過剰間隙水圧比の解析結果から完全な液状化には至っていないと考えられる。

しかしながら、東北地方太平洋沖地震では、EW 成分の過剰間隙水圧比が 0.6 を越えており、液状化の初期状態に近くなっていたと考えられる。図 3.4.3-2 の東北地方太平洋沖地震の有効応力解析結果で、深度 5.5m での液状化の可能性を確認するため、有効応力経路を作成し図 3.4.3-4 に示した。NS 成分と EW 成分を示しているが、より過剰間隙水圧比が高くなっている EW 成分(右図)では、図中の黒実線で示される変相角にかなり近づいており、横軸の有効上載圧も NS 成分より時間経過とともに小さくなってきている。このことから、実現象では、東北地方太平洋沖地震(本震)の方が千葉県東方沖地震よりも過剰間隙水圧比が高くなり、より液状化発生に近づいた可能性が高いと考えられる。

また、図 3.4.3-1 に示したように工学的基盤面における入力最大加速度は、東北地方太平洋沖地震が NS 方向 65.5cm/sec²、EW 方向 72.6cm/sec²、千葉県東方沖地震が、NS 方向 52.0cm/sec²、EW 方向 85.4cm/sec²と、両地震で最大加速度はほぼ同じ程度であるが、東北地方太平洋沖地震では、最大加速度に近い強さの揺れが繰り返し、継続時間が長くなっている。この継続時間(液状化に対する地震動の繰り返し)の影響が、図 3.4.3-2 の有効応力解析結果(東北地方太平洋沖地震の過剰間隙水圧比が、千葉県東方沖地震のそれよりも 1.6 倍程度高いという解析結果)に、顕著に表れたと考えられる。

東北地方太平洋沖地震と千葉県東方沖地震との有効応力解析による過剰間隙水圧比の違いは、入力地震動波形の継続時間、つまり液状化に対する地震動の繰り返し回数の違いによるものであることが、明らかになった。

c) 結論

以上より、有効応力解析から東北地方太平洋沖地震の本震では初期の液状化になった可能性があるが、完全な液状化には至っていなかったということが検証できた。さらに東北地方太平洋沖地震と千葉県東方沖地震の過剰間隙水圧比分布の大きさの違いは、両地震の継続時間(特に最大加速度に近い地震動の繰り返し)によるものと考えられた。

⁵ 過剰間隙水圧比：地震時に地盤に大きな力(応力)が加わると、地盤の水の部分の水圧(間隙水圧)が上昇し、土の部分(土骨格)がばらばらになることにより液状化現象が発生する。地震前の水圧(静水圧)を超える水圧を過剰間隙水圧といい、過剰間隙水圧の土の有効重量に対する比を過剰間隙水圧比という。液状化が発生するときは、過剰間隙水圧比が 1.0 に近い値を示す。

⁶ 地盤工学会(2000)：土質試験の方法と解説－第一回改訂版－，902pp.

⁷ 安田 進(1988)：液状化の調査から対策工まで pp.132-133.

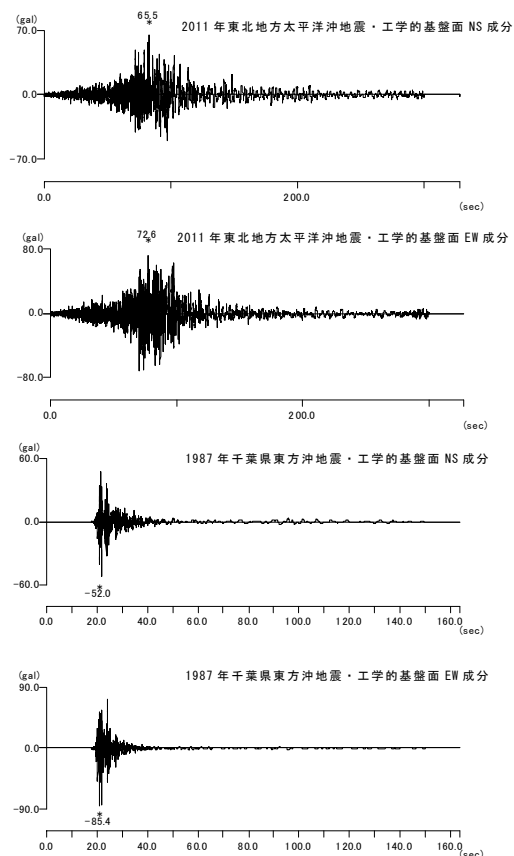


図 3.4.3-1 解析に用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震と 1987 年千葉県東方沖地震
入社加速度波形 (E)
(千葉県環境研究センターに
おける工学的基盤面)

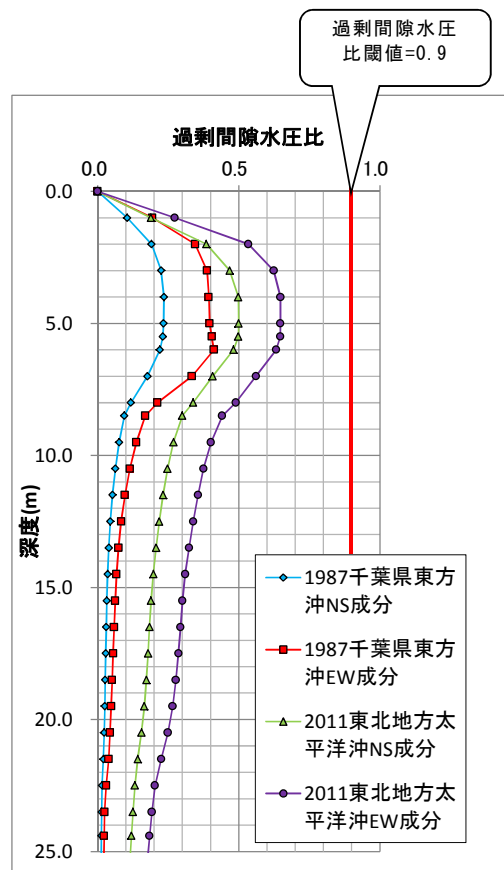


図 3.4.3-2 2011 年東北地方太平洋沖地震
と 1987 年千葉県東方沖地震の
過剰間隙水圧比分布の比較

表 3.4.3-1 有効応力解析に用いた千葉県環境研究センターの地盤モデル

地層 No.	土質	S波速度	深度 (上端)	深度 (下端)	層厚	単位体積 重量	液状化強度 比繰返し 回数20回	液状化強度 比繰返し 回数5回
		(m/sec)	(m)	(m)	(m)	(gf/cm ³)	(R_{L20})	(R_{L5})
1	細砂	140	0.0	5.5	5.5	1.79	0.249	0.450
2	細砂	190	5.5	8.0	2.5	1.76	0.240	0.265
3	細砂	250	8.0	23.5	15.5	1.79	0.408 ^{※1}	0.583 ^{※2}
4	シルト質 細砂	210	23.5	28.4	4.9	1.88	0.458	0.575
5	砂質粘土 (工学的基盤)	420	28.4	—	—	1.90	—	—

※1: 室内動的試験の結果が、N値と細粒分含有率(F_c)により道路橋示方書(2012)の推定式から求めた液状化強度比の層平均値に比べ低いことから、道路橋示方書(2012)の推定式により R_{L20} を算出し設定値とした。
さらに、Tatsuoka et al.(1988)²⁾による液状化強度の地盤生成年代による増加率(図3.1-3参照)を考慮して、 R_{L20} 値を1.4している。

※2: 【吉田望ほか(2009): 海溝型長継続時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性, 日本地震工学会論文集, vol.9, No.3, pp28-47.】による $R_{L5}=1.43R_{L20}$ 式による。

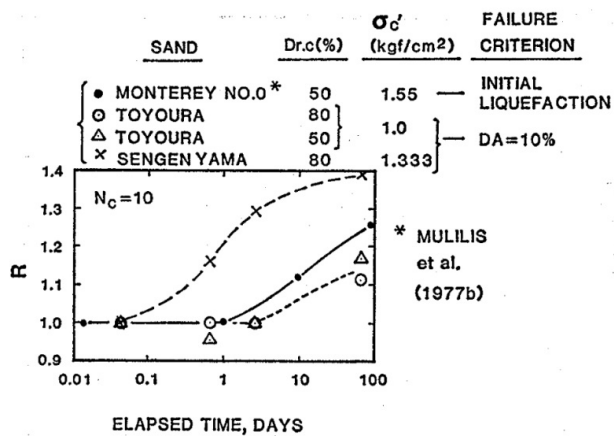


図 3.4.3-3 液状化強度増加率の経時変化
(年代効果による液状化強度比 R_{L20} の補正係数(R):Tatsuoka et al. (1988)²⁾)

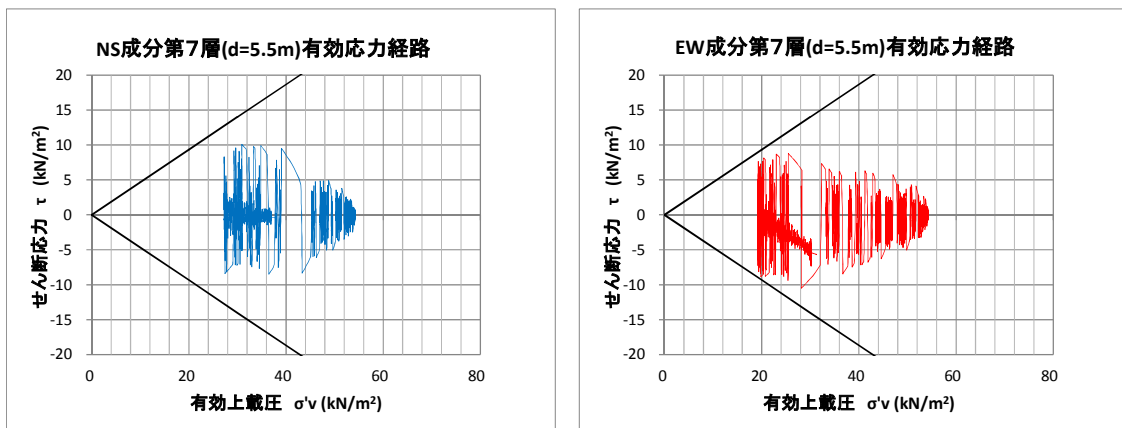


図 3.4.3-4 2011 年東北地方太平洋沖地震(本震: 図 3.4.3-2 参照)の
有効応力解析による第 7 層の有効応力経路 左図: NS 成分、右図: EW 成分

2) 余震を考慮した東北地方太平洋沖地震の解析

前節の東北地方太平洋沖地震の本震について、有効応力解析結果から完全な液状化が発生していないことが明らかになった。しかしながら、2章に示したように、現地被災状況およびコア観察記録でも噴砂が発生したことは確認されていることから、本震の発生直後（29分後）の最大余震（M7.6）を考慮した有効応力解析を実施した。

a) 解析条件

本震と最大余震を考慮した場合の入力加速度波形を図 3.4.3-5 に示す。地盤モデル、液状化強度比などの入力定数、解析ソフトについては、本震での解析と同じとした。ただし、地下水位については、本震で液状化の初期状態にあると考えられることから、過剰間隙水圧が上昇し、地下水位が上昇していることを考慮し G.L.-0.0m と設定した。

b) 解析結果

東北地方太平洋沖地震の本震のみの解析結果と、本震と最大余震を考慮した場合(本震+余震)の過剰間隙水圧比を重ねて、図 3.4.3-6 に示した。

本震の過剰間隙水圧比の最大値は、EW 方向の深度 5.5m で 0.65 程度であったが、本震+余震の過剰間隙水圧比は、NS 成分が深度約 3.5m 以浅で 0.9 を超え、EW 成分では深度約 6.5m 以浅で 0.9 を超え、完全に液状化する結果となった（図 3.4.3-6）。

さらに、本震+余震の P_L 値による液状化の可能性を検討するため、有効応力解析による最大せん断応力値を用いた液状化判定結果を、図 3.4.3-7(1)～(2) (F_L 値) および表 3.4.3-2 (P_L 値) に示した。波形の方向 (NS 波、EW 波) による入力最大加速度値の違いにより、 P_L 値は 2.4 (NS 波)、32.3 (EW 波) となる。 P_L 値による液状化危険度の判定区分に照らすと、顕著な液状化が発生するとされる閾値の P_L 値=15.0 を EW 波の P_L 値は超えるが、NS 波は P_L 値=5.0 以下の液状化の危険度は低いに区分される。

c) 結論

千葉県環境研究センターで実施したボーリングデータを用いた東北地方太平洋沖地震の本震+余震の有効応力解析から、余震による地震動の継続時間が長くなったことにより、液状化が発生したと考えられる。

3) 課題

沖積層の液状化強度の年代効果については、今後の課題と考える。また、東北地方太平洋沖地震の本震+余震の有効応力解析では、NS 成分が深度約 3.5m 以浅で過剰間隙水圧比が 0.9 を超え、液状化する結果となり、ボーリングコア観察結果とよく一致する。しかしながら、EW 成分では深度約 6.5m 以浅で 0.9 を超え、深くから液状化する結果となった。有効応力解析結果による NS 成分が深度約 3.5m 以浅で液状化する結果に問題はないと考ええるが、EW 成分では 6.5m とやや深くから液状化する結果となっており、この違いは、解析の限界等を含め今後の課題と考えられる。

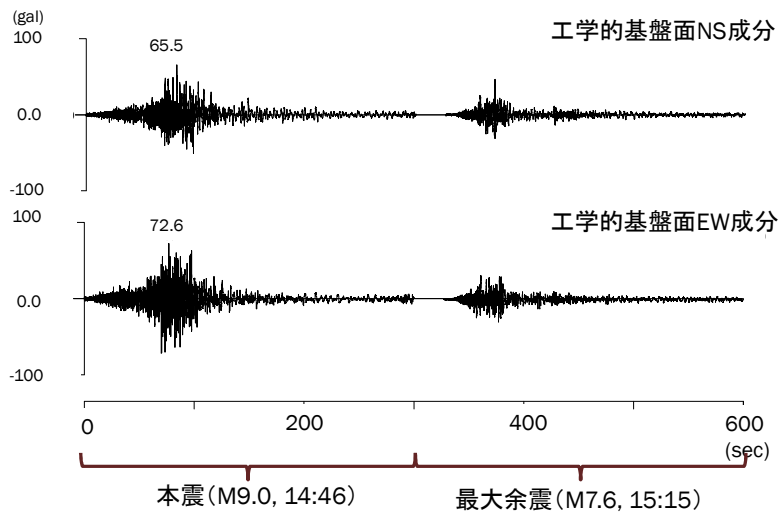


図 3.4.3-5 解析に用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震の
工学的基盤面における入射波形 (E)
(本震の後に最大余震の波形と続けたもの)

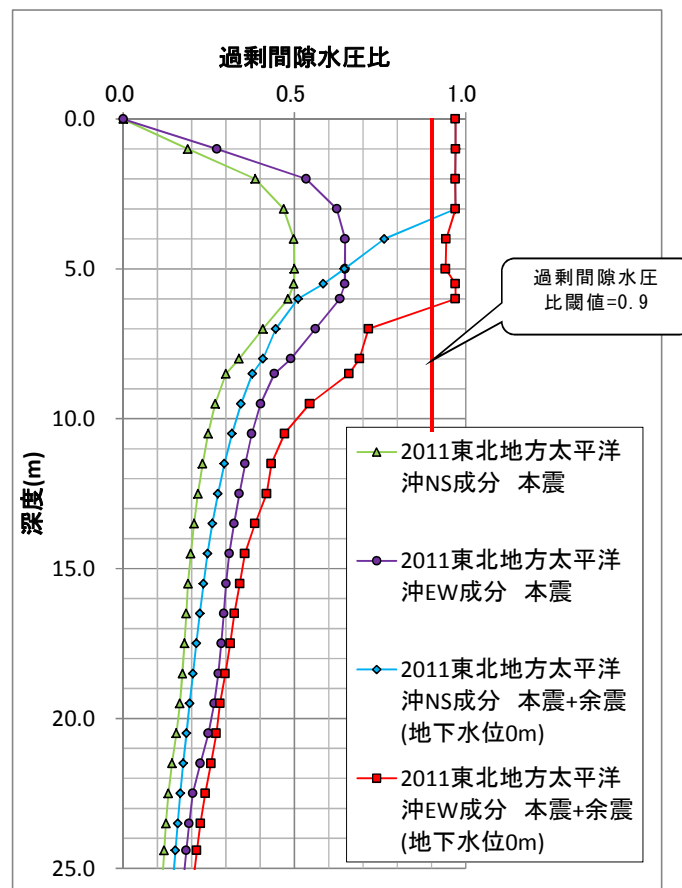
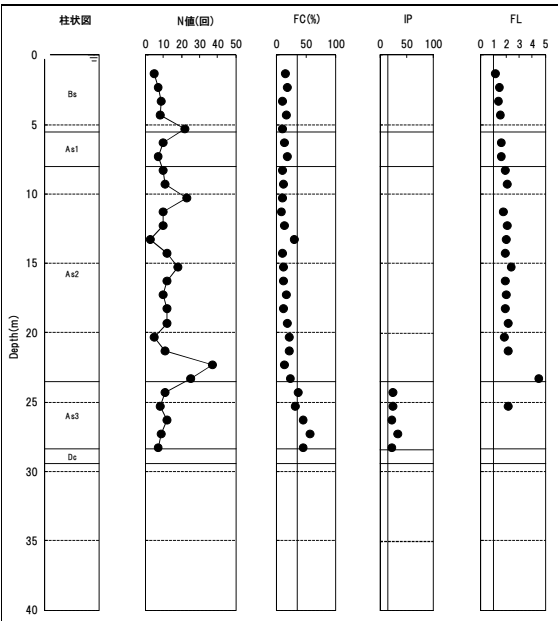


図 3.4.3-6 有効応力解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震の
過剰間隙水圧比分布の比較
(本震のみを考慮した場合と本震+余震を考慮した場合の比較)

道路橋示方書(2012)による液状化判定結果 東北地方太平洋沖 本震+余震 NS Cw=0.8 地下水位 G.L.-0.0m

PL值 2.406

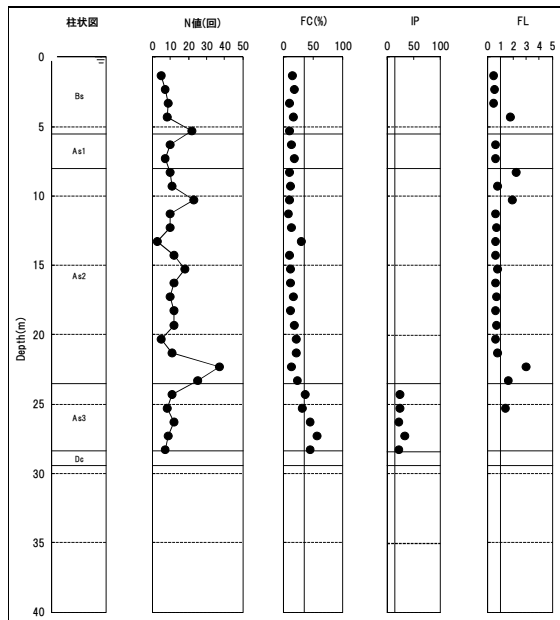
[illegible]

土質 記号	判定深度 (m)	N値	σ_v (kN/m ²)	σ_v' (kN/m ²)	N ₁ 値	FC (%)	IP	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	判定	Na	R _L	cw	R	τ_d (kN/m ²)	L	F _L	液状化の判定
Bs	1.30	5	22.83	9.83	10.648	15.7	999.0	0.15	0.04	する	17.486	0.283	0.800	0.227	2.599	0.264	0.857	液状化する
Bs	2.30	7	40.39	17.39	13.617	18.3	999.0	0.16	0.03	する	21.837	0.333	0.800	0.266	4.238	0.244	1.093	液状化しない
Bs	3.30	9	57.95	24.95	16.114	10.0	999.0	0.18	0.08	する	18.883	0.296	0.800	0.237	5.589	0.224	1.057	液状化しない
Bs	4.30	8	75.51	32.51	13.267	16.6	999.0	0.18	0.04	する	20.608	0.315	0.800	0.252	6.802	0.209	1.204	液状化しない
Bs	5.30	22	93.07	40.07	33.979	10.4	999.0	0.16	0.07	する	37.102	2.602	0.800	2.082	7.517	0.188	11.097	液状化しない
As1	6.30	10	108.80	45.80	14.680	13.4	999.0	0.21	0.05	する	20.089	0.370	0.800	0.296	8.852	0.193	1.533	液状化しない
As1	7.30	7	126.07	53.07	9.669	19.0	999.0	0.26	0.01	する	18.228	0.348	0.800	0.278	9.802	0.185	1.507	液状化しない
As2	8.30	10	145.75	62.75	12.806	11.3	999.0	0.21	0.05	する	16.678	0.276	0.800	0.310	11.020	0.176	1.763	液状化しない
As2	9.30	11	163.31	70.31	13.328	12.5	999.0	0.20	0.04	する	18.110	0.289	0.800	0.323	11.970	0.170	1.900	液状化しない
As2	10.30	23	180.87	77.87	26.443	10.6	999.0	0.25	0.06	する	29.737	0.758	0.800	0.849	12.960	0.166	5.102	液状化しない
As2	11.30	10	198.43	85.43	10.938	8.6	999.0	0.27	0.10	する	12.346	0.238	0.800	0.266	14.520	0.170	1.566	液状化しない
As2	12.30	10	215.99	92.99	10.430	14.7	999.0	0.25	0.03	する	16.674	0.276	0.800	0.310	16.050	0.173	1.793	液状化しない
As2	13.30	3	233.55	100.55	2.990	30.1	999.0	0.13	0.00	する	15.699	0.268	0.800	0.300	17.540	0.174	1.721	液状化しない
As2	14.30	12	251.11	108.11	11.454	10.8	999.0	0.23	0.07	する	14.917	0.261	0.800	0.293	18.990	0.176	1.666	液状化しない
As2	15.30	18	268.67	115.67	16.481	12.3	999.0	0.16	0.05	する	21.117	0.322	0.800	0.360	20.410	0.176	2.043	液状化しない
As2	16.30	12	286.23	123.23	10.557	12.4	999.0	0.15	0.04	する	15.267	0.264	0.800	0.296	21.770	0.177	1.676	液状化しない
As2	17.30	10	303.79	130.79	8.467	17.4	999.0	0.27	0.01	する	16.232	0.273	0.800	0.305	23.090	0.177	1.729	液状化しない
As2	18.30	12	321.35	138.35	9.791	12.3	999.0	0.17	0.05	する	14.428	0.257	0.800	0.288	24.360	0.176	1.634	液状化しない
As2	19.30	12	338.91	145.91	9.448	18.8	999.0	0.21	0.01	する	17.911	0.287	0.800	0.321	25.580	0.175	1.834	液状化しない
As2	20.30	5	356.47	153.47	3.804	21.7	999.0	0.19	0.01	する	13.561	0.249	0.800	0.279	26.910	0.175	1.591	液状化しない
As2	21.30	11	374.03	161.03	8.094	22.5	999.0	0.19	0.01	する	18.178	0.289	0.800	0.324	28.230	0.175	1.849	液状化しない

図 3.4.3-7(1) 有効応力解析による最大せん断応力値を用いた F_v 値・ P_v 値液状化判定 (2011 年東北地方太平洋沖地震・本震+余震・NS 成分・地下水位 GL-0m)

道路橋示方書(2012)による液状化判定結果 東北地方太平洋沖 本震+余震 EW Cw=0.8 地下水位 G.L.-0.0m

PL值 32.289

[illegible]

土質記号	判定深度 (m)	N値	σ_v (kN/m ²)	σ_v' (kN/m ²)	N ₁ 値	FC (%)	IP	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	判定	Na	R _L	cw	R	τ_u (kN/m ²)	L	F _L	液状化の判定
Bs	1.30	5	22.83	9.83	10.648	15.7	999.0	0.15	0.04	する	17.486	0.283	0.800	0.227	5.409	0.550	0.412	液状化する
Bs	2.30	7	40.39	17.39	13.617	18.3	999.0	0.16	0.03	する	21.837	0.333	0.800	0.266	9.007	0.518	0.514	液状化する
Bs	3.30	9	57.95	24.95	16.114	10.0	999.0	0.18	0.08	する	18.883	0.296	0.800	0.237	12.460	0.499	0.474	液状化する
Bs	4.30	8	75.51	32.51	13.267	16.6	999.0	0.18	0.04	する	20.608	0.315	0.800	0.252	8.529	0.262	0.960	液状化する
Bs	5.30	22	93.07	40.07	33.979	10.4	999.0	0.16	0.07	する	37.102	2.602	0.800	2.082	8.721	0.218	9.565	液状化しない
As1	6.30	10	108.80	45.80	14.680	13.4	999.0	0.21	0.05	する	20.089	0.370	0.800	0.296	20.460	0.447	0.663	液状化する
As1	7.30	7	126.07	53.07	9.669	19.0	999.0	0.26	0.01	する	18.228	0.348	0.800	0.278	23.040	0.434	0.641	液状化する
As2	8.30	10	145.75	62.75	12.806	11.3	999.0	0.21	0.05	する	16.678	0.276	0.800	0.310	16.630	0.265	1.168	液状化しない
As2	9.30	11	163.31	70.31	13.328	12.5	999.0	0.20	0.04	する	18.110	0.289	0.800	0.323	29.420	0.418	0.773	液状化する
As2	10.30	23	180.87	77.87	26.443	10.6	999.0	0.25	0.06	する	29.737	0.758	0.800	0.849	32.230	0.414	2.052	液状化しない
As2	11.30	10	198.43	85.43	10.938	8.6	999.0	0.27	0.10	する	12.346	0.238	0.800	0.266	35.970	0.421	0.632	液状化する
As2	12.30	10	215.99	92.99	10.430	14.7	999.0	0.25	0.03	する	16.674	0.276	0.800	0.310	39.680	0.427	0.725	液状化する
As2	13.30	3	233.55	100.55	2.990	30.1	999.0	0.13	0.00	する	15.699	0.268	0.800	0.300	43.340	0.431	0.696	液状化する
As2	14.30	12	251.11	108.11	11.454	10.8	999.0	0.23	0.07	する	14.917	0.261	0.800	0.293	46.960	0.434	0.674	液状化する
As2	15.30	18	268.67	115.67	16.481	12.3	999.0	0.16	0.05	する	21.117	0.322	0.800	0.360	50.580	0.437	0.824	液状化する
As2	16.30	12	286.23	123.23	10.557	12.4	999.0	0.15	0.04	する	15.267	0.264	0.800	0.296	54.200	0.440	0.673	液状化する
As2	17.30	10	303.79	130.79	8.467	17.4	999.0	0.27	0.01	する	16.232	0.273	0.800	0.305	57.860	0.442	0.690	液状化する
As2	18.30	12	321.35	138.35	9.791	12.3	999.0	0.17	0.05	する	14.428	0.257	0.800	0.288	61.540	0.445	0.647	液状化する
As2	19.30	12	338.91	145.91	9.448	18.8	999.0	0.21	0.01	する	17.911	0.287	0.800	0.321	65.270	0.447	0.719	液状化する
As2	20.30	5	356.47	153.47	3.804	21.7	999.0	0.19	0.01	する	13.561	0.249	0.800	0.279	68.970	0.449	0.621	液状化する
As2	21.30	11	374.03	161.03	8.094	22.5	999.0	0.19	0.01	する	18.178	0.289	0.800	0.324	72.650	0.451	0.718	液状化する
As2	22.30	37	391.59	168.59	26.363	14.0	999.0	0.26	0.04	する	32.167	1.127	0.800	1.262	76.280	0.452	2.789	液状化しない
As2	23.30	25	409.15	176.15	17.266	24.0	999.0	0.21	0.01	する	27.932	0.582	0.800	0.652	79.920	0.454	1.438	液状化しない
As3	24.30	11	448.09	205.09	6.798	36.9	24.7	0.16	0.01	しない					83.550			
As3	25.30	8	466.53	213.53	4.797	33.0	24.7	0.15	0.00	する	18.335	0.291	0.800	0.233	69.600	0.326	0.714	液状化する
As3	26.30	12	484.97	221.97	6.987	45.5	23.1	0.10	0.00	しない					70.020			
As3	27.30	9	503.41	230.41	5.093	57.2	34.0	0.04	0.00	しない					70.510			
As3	28.30	7	521.85	238.85	3.853	45.6	23.5	0.10	0.00	しない					71.070			

図 3.4.3-7(2) 有効応力解析による最大せん断応力値を用いた F_L 値・ P_L 値液化判定 (2011 年東北地方太平洋沖地震・本震+余震・EW 成分・地下水位 GL-0m)

表 3. 4. 3-2 有効応力解析による最大せん断応力値を用いた液状化判定結果
P_L 値一覧表(余震を考慮した結果)

No.	解析ケース	P _L 値	
		2011年東北 地方太平洋 沖地震 本震+余震 NS波	2011年東北 地方太平洋 沖地震 本震+余震 EW波
1	余震を考慮した解析 (地下水位GL-0.0mを仮定)	2.4	32.3

3.5 各地域の液状化の原因とメカニズム

2011年東北地方太平洋沖地震による、千葉市美浜区、習志野市、我孫子市、浦安市、香取市における各地域の液状化の原因とメカニズムについて考察した。この最大加速度及び震度階は2.2で求めた再現計算での数値である。

1) 千葉市美浜区

千葉市美浜区では、地震動の大きさは最大加速度150～330gal（震度5弱～6弱）程度であり、多くの地点で液状化が発生している。図3.3-1(2)によれば、地下水位は、ほぼG.L.-2.0m程度であるが、海岸に向かって地下水位の深い地域が筋状に連なっている地域もある。

千葉県美浜区の液状化層^{*}分布の特徴は、砂と粘土の層相が非常に複雑に分布しており、埋め立て時の吹き出しポンプの位置、埋立土の地質、締め切りの位置などの影響と考えられる。分布する砂の細粒分含有率はそれほど高くなく、地震動も浦安地区などよりも強いいため、表層近くに分布する砂層が液状化したと考えられる。不規則に分布する粘土層が存在する地域では、液状化が発生しない。

1987年千葉県東方沖地震でもいくつかの地点で液状化している。

表 3.5-1 (1) 千葉市美浜区における液状化の原因とメカニズム

No.	地区	地震動の 大きさ (最大加速度)	震度階	地下水位	液状化層の分布状況 (FL値からの考察)	1987年千葉県東方沖地震で の同地区の液状化状況	液状化の原因とメカニズム
1	千葉市美浜区	330gal (美浜区高洲) ～150gal	6弱(5.6美浜区高洲) ～5弱	ほぼG.L.-2.0m 以浅であるが、 海岸に向かって 地下水位の深い 分布が筋状に 連なっている	層相が非常に複雑であるが、 ほぼG.L.-10m程度までに分布する 砂層はほぼFL<1.0のため液状 化した可能性が高い	多数の地点が液状化している	細粒分が少ない緩い砂が不規則に分布している。地震動も浦安地区などより最大加速度が大きく、全域で液状化の可能性が高いが、地盤の層相が不規則に異なり粘土層が非常に厚く堆積する地点は、液状化は発生しない

2) 習志野市

習志野市では、地震動の大きさは160～280gal（震度5弱～5強）程度である。深度10m付近から分布する粘土層の上位の砂層のFL値が1.0以下であることから液状化した可能性が高い。地下水はG.L.-1.0m～G.L.-2.0m付近に分布する（図3.3-1(2)）。

習志野市に分布する砂層の細粒分含有率は、千葉市美浜区とほぼ同じ程度である。1987年千葉県東方沖地震では、液状化は発生していない。これは、千葉市美浜区に比べ地震動がやや小さく、千葉市美浜区よりも砂層と粘土層の層相の変化が少なく、砂層の液状化層の厚さが薄いことによるものと考えられる。

^{*}液状化層：地盤の中で液状化現象が実際に発生した範囲。液状化しやすい緩い砂質土は通常層状の分布を示すため、液状化層としてみなすことができる。液状化層は、ボーリングにより乱さないコア試料を採取し、詳細に観察することにより判定することができる。

表 3.5-1 (2) 千葉市美浜区における液状化の原因とメカニズム

No.	地区	地震動の 大きさ (最大加速度)	震度階	地下水位	液状化層の分布状況 (FL値からの考察)	1987年千葉県東方沖地震で の同地区の液状化状況	液状化の原因とメカニズム
2	習志野市	280gal (習志野市茜 浜) ～160gal	5強(5.4習志 野市秋津) ～5弱	GL-1.0m～ GL-2.0mに分 布する	深度10m(標高-8m)付近から 分布する粘土層の上部の砂層 がほとんどFL<1.0のため液状化 した可能性が高い	液状化は発生していない	砂層の細粒分は千葉市美浜区 とほぼ同程度である。地震動は 千葉市美浜区より最大加速度 は小さい。FL値が1.0より下回る 砂層が連続するため液状化が 発生している

3) 我孫子市

我孫子市都地区では、地震動の大きさは最大加速度 160～410gal（震度 5 弱～6 弱）と推定される。図 3.3-3 (2) によれば、我孫子市の地下水位は浅く、G.L.-1.0m～1.5m にある。

我孫子市の液状化層分布の特徴は、深度 4m 以深に厚い粘土層が分布し、液状化層が極浅部に限られることである。地下水位が浅いため、粘土層以浅の N 値 1～8 の人工的に埋められた緩い砂が液状化した可能性が高い。1987 年千葉県東方沖地震では液状化は発生していない。

表 3.5-1 (3) 我孫子市における液状化の原因とメカニズム

No.	地区	地震動の 大きさ (最大加速度)	震度階	地下水位	液状化層の分布状況 (FL値からの考察)	1987年千葉県東方沖地震で の同地区の液状化状況	液状化の原因とメカニズム
3	我孫子市	410gal (我孫子市布 佐) ～160gal	6弱(5.9我孫 子市江蔵地) ～5弱	ボーリング No.111は、GL- 1.0m～1.5mに 地下水位が分 布する	深度4m(標高±0m)付近に分 布する粘土層以浅の砂層の FL<1.0で液状化した可能性が 高い。砂層の層厚は薄い	液状化は発生していない	深度4m以深に厚い粘土層が分 布するため、液状化発生層は限 られる。地下水位が1.5m以浅と 非常に浅く分布するため、粘土 層以浅の緩い砂が液状化した 可能性が高い

4) 浦安市

浦安市では、地震動の大きさは最大加速度 120～210gal（震度 5 弱～5 強）程度であり、広範囲で液状化が発生している。図 3.3-5 (2) によれば、地下水位は浅く、G.L.-1.0m～1.5m に位置するが、地域ごとにその深さは若干異なっている。

浦安市の液状化層の特徴は、細粒分含有率が 20～40%と高いことであり、繰返し三軸試験の液状化強度も高くなっている。最大加速度も千葉市美浜区に比べて小さいことから、地震動の継続時間が液状化発生に対して影響していると考えられる。

1987 年千葉県東方沖地震では 5 地点程度で液状化発生が発生しており、今回は 1987 年千葉県東方沖地震に比較できないほど広範囲に液状化している。

表 3. 5-1 (4) 浦安市における液状化の原因とメカニズム

No.	地区	地震動の 大きさ (最大加速度)	震度階	地下水位	液状化層の分布状況 (FL値からの考察)	1987年千葉県東方沖地震で の同地区の液状化状況	液状化の原因とメカニズム
4	浦安市	210gal (浦安市海浜) ～120gal	5弱～5強(5.3 浦安市美浜)	ボーリング No.10は、GL- 1.0m～1.5mに 地下水位が分 布する	標高-8m～-12m付近から分布 する厚い粘土層の上部の埋土 層及び沖積砂層のFL<1.0で液 状化した可能性が高い	海浜1丁目、高浜3丁目で5箇 所程度液状化が発生している	沖積層、浚渫土層とも細粒含有 率が高く、繰返し三軸試験に よる液状化強度も千葉市美浜 区よりも高くなっている。地震動 も千葉市美浜区に比べ最大加 速度が小さい。地震動の継続時 間が長い影響がでている可能 性もある。1987年千葉県東方 沖地震の液状化発生地点より もかなり多数の地点が液状化し ている

5) 香取市

香取市では、地震動の大きさは210～460gal（震度5弱～6弱）と大きく、多数の液状化が発生している。地下水位は、G.L.-0.5m～1.0mと非常に浅い深度に位置する。

利根川沿いの埋立地で、砂層の分布層厚も厚く、地下水位も非常に浅いため、強い地震動と余震が加わった長い継続時間により液状化が発生したと考えられる。

1987年千葉県東方沖地震でも利根川沿いに液状化が多数発生しているが、この原因としては、利根川の浚渫砂で埋め立てられたところが液状化したと考えられている。今回の地震でもほぼ同様な地域が液状化している。

表 3. 5-1 (5) 香取市における液状化の原因とメカニズム

No.	地区	地震動の 大きさ (最大加速度)	震度階	地下水位	液状化層の分布状況 (FL値からの考察)	1987年千葉県東方沖地震で の同地区の液状化状況	液状化の原因とメカニズム
5	香取市	460gal (佐原市イ) ～210gal	6弱(5.8佐原 市イ) ～5弱	ボーリング⑫、 ⑬、⑭はすべ てGL-0.5m～ 1.0mに地下 水位が分布する	ボーリングNo.12、No.13と砂層 が15m以上分布する。No.19は 粘土層が他のボーリング地点よ り粘土層が厚い。	利根川沿いに液状化が多数発 生している	利根川沿いで、砂層の分布層 厚も厚く、地下水位も高く、地震 動も300gal～400gal程度あつた と推測され、粘土層がやや厚く 分布する地点以外は液状化が 発生したと考えられる

3.6 再液状化の検討

液状化により、地震前に緩かった砂地盤は、間隙水が抜け出して密になると考えられることから、理論上や室内実験は一度液状化した砂地盤は、再度の液状化に対しては抵抗力が高くなると考えられている。

しかしながら実際の地盤では、地盤の不均一性のため、地震時に全ての地盤が液状化しているとは限らず、地震後でも砂の地盤は緩いままであり、一度液状化した地盤でも再度の液状化が起こりうる。また、過剰間隙水圧が完全に消散していなければ、再液状化が起こりうる。実際に、2章で述べたように、千葉県東方沖地震で液状化した地域においても、東北地方太平洋沖地震で再度液状化している場合が多く見られる。また、例えば、2011年ニュージーランド Christchurch 地震においては、再液状化の事例が報告されている。

ここで、東北地方太平洋沖地震で液状化した地点において地盤がどのように変化しているか、地震前後のボーリングデータを比較する。

浦安市の高洲8丁目において、2011年東北地方太平洋沖地震前の平成22年9月にボーリング調査が実施された。同地区では、東北地方太平洋沖地震の際には、広く液状化現象が発生したが、大阪市立大学によって平成23年11月に同地区で調査が行われ、その際に、同一地点において再度ボーリング調査が行われた。

図3.6-1に地震前後のボーリング柱状図の比較を、図3.6-2にN値の比較を示す。これらのデータからは、地震の前後でN値に明瞭な差は確認できず、液状化現象による地盤の強度が増すという現象は確認できなかった。ただし、両者は、標準貫入試験の実施方法に違いがある（地震前は1m毎、地震後は50cm毎に試験を実施した）ため、地震前後の両方のN値がある深度のデータのみを示した。また、地点が若干異なるため土質区分には若干層相の違いがみられるが、観察者が異なることによる相違（シルト質砂と砂質シルトなど）とも考えられ、ほぼ同一地点とみなしてよいといえる。

また、清田ら（2011）による、浦安市弁天町における地震前後のスウェーデン式サウンディング試験*結果の比較を図3.6-3に示す。地震前については2002年9月に、地震後については、2011年3月18日、4月13日、5月16日、及び7月27日の結果が示されている。

清田らによれば、地震発生1週間後に計測された貫入抵抗（換算N値）は、地震前の値と比較して大きく低下している傾向にあるが、その後強度は回復し、地震後1~2ヶ月で地震前と同程度まで回復したとしている。何れの結果によっても、液状化による地盤の強度の増加は実地盤に関しては確認することができない。このことや過去の例からも、地震時に一度液状化した地盤であっても、再液状化する危険性があり、注意が必要である。

*スウェーデン式サウンディング試験：先端にスクリーンのついた金属棒を、ネジ回しの要領で回転させながら地盤に貫入し、回転回数と貫入深度の関係から、地盤の硬さを求める試験。ボーリングのN値との関係性が提案されており、換算N値を求めることができる。

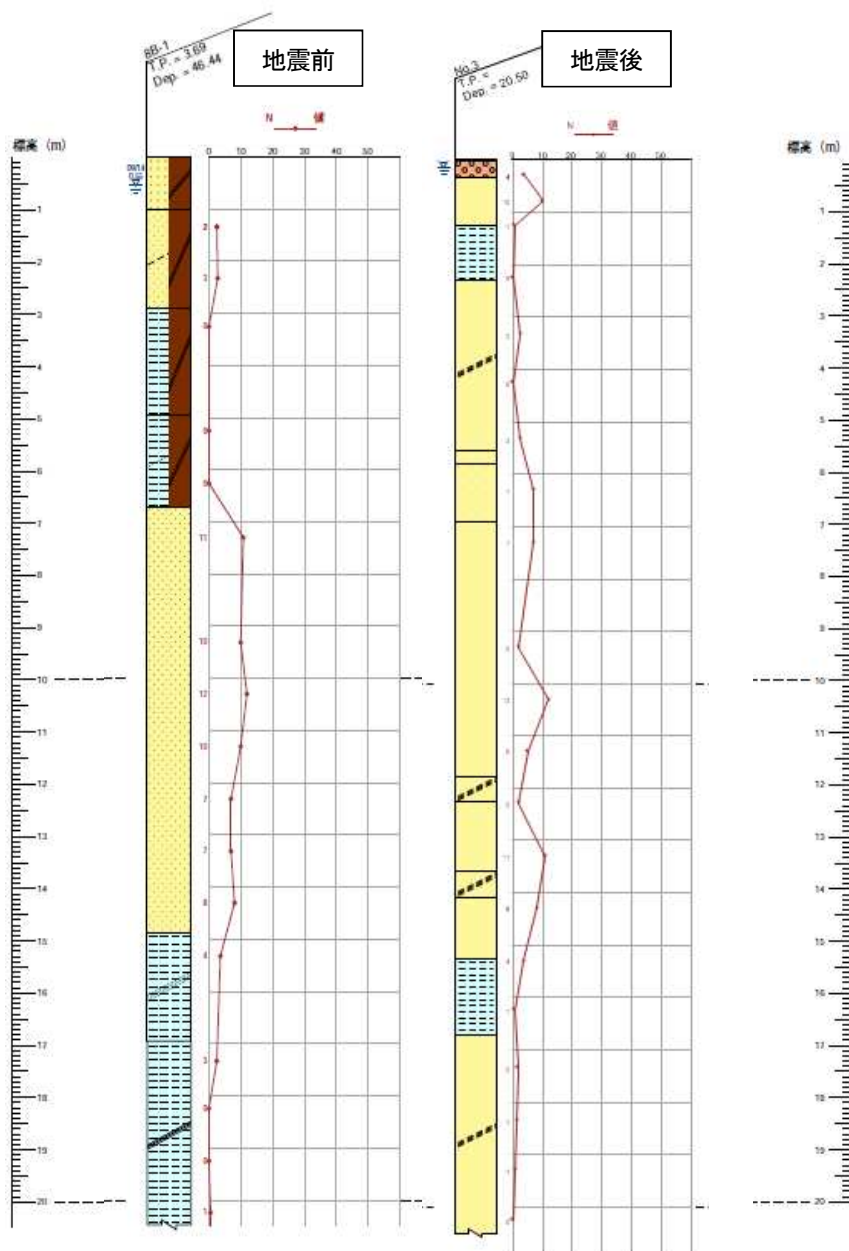


図 3. 6-1 浦安市高洲 8 丁目における地震前後のボーリング柱状図の比較
 [千葉県企業庁千葉建設事務所・基礎地盤コンサルタンツ株式会社 (2011)
 及び大阪市立大学提供資料より作成]

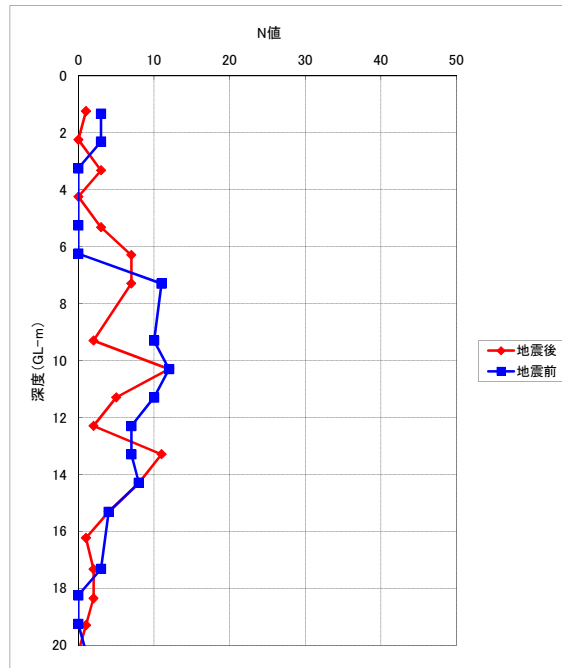


図 3.6-2 浦安市高洲 8 丁目における地震前後の N 値の比較
 [千葉県企業庁千葉建設事務所・基礎地盤コンサルタンツ株式会社 (2011)
 及び大阪市立大学提供資料より作成]

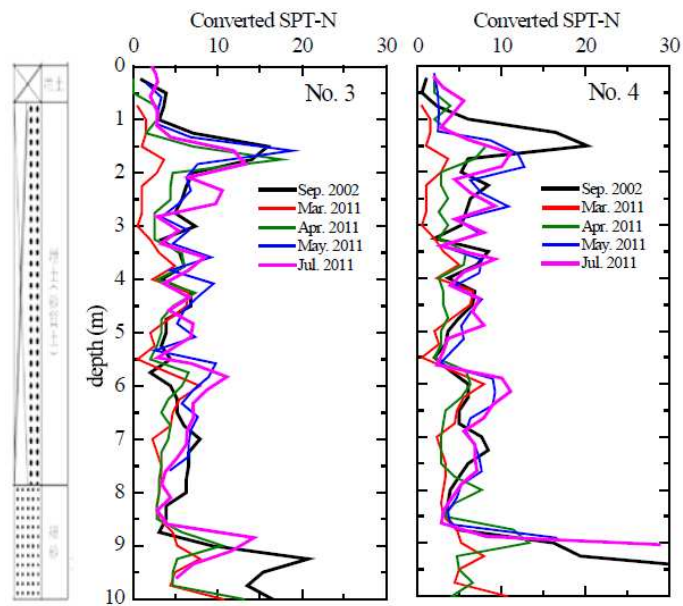


図 3.6-3 浦安市弁天町における地震前後の
 スウェーデン式サウンディング試験結果の比較
 [出典：清田ら (2011)]